УДК 621.373.826

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ВОДОРОДА НА ЧАСТОТНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ CuBr-ЛАЗЕРА

Д.В. Шиянов*, Г.С. Евтушенко**, В.Б. Суханов*, В.Д. Бочков***, В.Н. Кудинов***

*Институт оптики атмосферы СО РАН. г. Томск. E-mail: qel@asd.iao.ru
**Томский политехнический университет. г. Томск. E-mail: ime@tpu.ru
***"Импульсные технологии". г. Рязань. E-mail: info@pulsetech.ru

Представлены результаты экспериментального исследования лазера на парах бромида меди с добавками водорода. Добавки водорода в разряд осуществлялись от специального генератора H_2. Показано, что введение малых добавок водорода (< 0,5 %) приводит к существенному увеличению частоты следования импульсов излучения, КПД и средней мощности CuBr-лазера.

Введение

Одно из важнейших преимуществ импульсно-периодических лазеров на парах галогенидов металлов (ЛПГМ) – возможность работы при температурах активной среды на 1000 К ниже, чем температура среды (~1800 К) в лазерах на парах чистых металлов (ЛПМ). Это существенно упрощает и удешевляет конструкцию активного элемента, а выходные характеристики ЛПГМ не уступают характеристикам ЛПМ. В частности, лучшие генерационные характеристики для импульсно-периодических лазеров видимого диапазона получены для лазера на бромиде меди с добавками водорода и его аналога – гибридного лазера (CuHyBrID-laser), поскольку водородные добавки значительно увеличивают выходные параметры этих лазеров за счет изменения кинетики активной среды в сторону благоприятную для накачки рабочих состояний. Однако, существует проблема удержания H_2 в активной среде отпаянного лазера длительное время, так как его количество со временем уменьшается. Вместе с тем, именно с ЛПГМ получены наибольшая эффективность генерации – более 3 % [1], при высокой средней мощности (более 100 Вт) [2] и удельная мощность (до 2 Вт/см^3) [3], самая высокая частота повторения импульсов генерации – 300 кГц [4]. На сегодняшний день ЛПГМ уступают ЛПМ только по суммарной средней мощности излучения, снимаемой с одного активного элемента.

Известно, что дальнейшее увеличение мощности генерации ЛПГМ связано с реализацией высоких частот следования импульсов излучения и увеличением энергосъема в газоразрядных трубках (ГРТ) больших объемов. Это открывает новые области их применения, например, при исследовании быстропротекающих процессов, записи голограмм, в медицинских приложениях и т.д.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Наряду с тем, что водородные добавки улучшают выходные параметры CuBr-лазеров они также и увеличивают область оптимальных частот следования импульсов генерации. Поэтому мы поставили задачу, используя специально разработанные селективные реверсивные натекатели водорода (СРНВ) исследовать влияние добавок H_2 на выходные параметры CuBr-лазеров, масштабируемых по длине и диаметру активной зоны, а также реализовать практически значимые средние мощности на частотах более 100 кГц в ГРТ среднего объема, без прокачки активной среды. Ранее генератор подобного типа был использован для работы с активным элементом CuBr-лазера, но срок службы данного генератора в химически агрессивной среде не превышал нескольких часов [5]. В данной модификации предусмотрена специальная конструкция на основе селективной мембраны, проницаемой только для водорода и исключающая возможность отравления генератора [6].

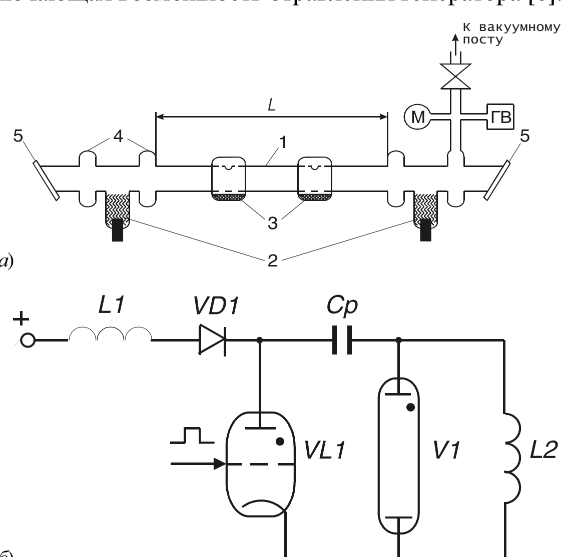
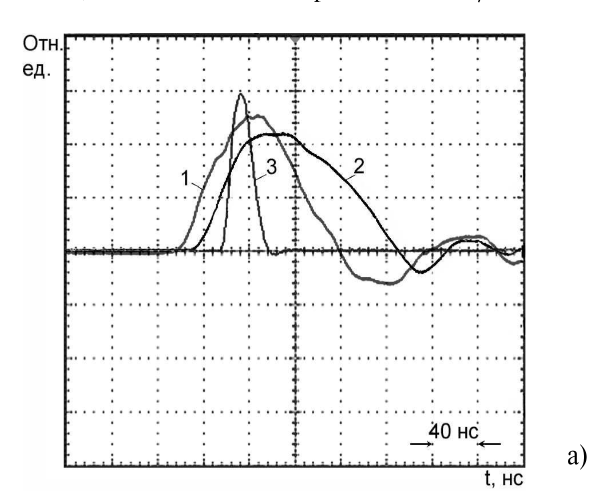


Рис. 1. *а) Конструкция ГРТ: 1) рабочий канал (L – длина активной зоны), 2) электроды, 3) контейнеры с рабочим веществом, 4) ловушки, снижающие степень загрязнения электродов и выходных окон рабочим веществом, 5) выходные окна, М – манометр, ГВ – генератор водорода; б) схема накачки ГРТ: L1, VD1 – зарядные индуктивность и диод, VL1 – тиратрон, C_p – рабочая емкость, L2 – шунтирующая индуктивность, V1 – газоразрядная трубка*

Исходя из этого, в холодную зону ГРТ со стороны анода припаивался генератор H_2 и манометр деформационного типа (цена деления шкалы – 0,02 торр) для определения давления вводимого H_2. Во всех случаях в качестве буферного газа использовался Ne. Упрощенная конструкция ГРТ приведена на рис. 1, *а*. Для достижения рабочей температуры стенки ГРТ ее

активная зона утеплялась слоем теплоизолятора. Возбуждение газоразрядных трубок производилось разрядом рабочей емкости через тиратрон ТГИ1-1000/25 – рис. 1, *б*. При исследовании частотно-энергетических характеристик лазеров (среднего диаметра) с частотами следования импульсов более 20 кГц использовался таситрон ТГУ1-1000/25.



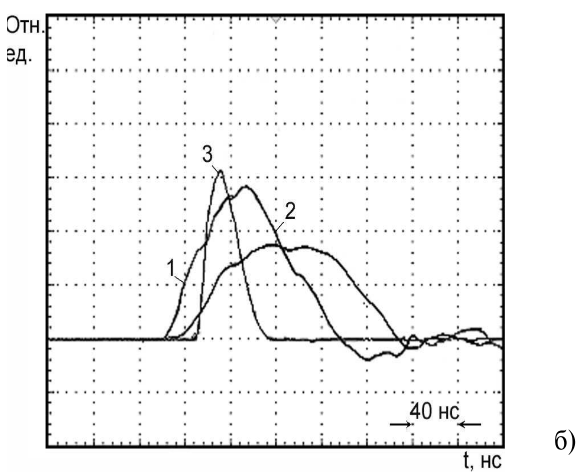


Рис. 2. *Осциллограммы импульсов: 1) напряжения, 2) тока и 3) генерации для ГРТ диаметром 3,6 см, длиной 120 см, при частоте следования импульсов накачки 16 кГц: а) разряд в Ne, без добавок H_2 (средняя мощность излучения, суммарная по двум линиям — 13 Вт), б) с добавкой H_2 (мощность излучения — 25 Вт)*

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы напряжения на трубке, тока через разрядный промежуток и импульса генерации без добавок водорода к буферному газу и с введенной примесью H_2. Из осциллограмм видно, что с введением водорода разряд "затрудняется" – нарастание импульса тока "задерживается" относительно приложенного напряжения. Такое изменение электрических характеристик положительно сказывается на выходных параметрах лазера. Длительность импульса генерации увеличивается в 1,5...2 раза, практически в два раза возрастают средняя мощность и КПД лазера. В последнее время влияние добавок на качественном уровне объясняется образованием и присутствием в активной среде этих лазеров электроотрицательных молекул (HBr) с большим сечением диссоциативного прилипания электронов [7]. Это приводит к тому, что, во-первых, в начальные моменты разряда, пока температура электронов невелика, скорость прилипания больше, чем скорость ионизации меди. В результате разряд не может развиваться до тех пор, пока температура электронов не достигнет величины, зависящей от соотношения концентраций атомов меди и молекул добавки. Подбирая концентрацию молекул, можно задержать развитие разряда до момента, при котором преимущественно заселяются верхние лазерные уровни, и избежать чрезмерного заселения нижних уровней. Во-вторых, в межимпульсный период основную роль уже играет не трехчастичная рекомбинация, а прилипание электронов к молекулам с последующей ион-ионной рекомбинацией. Это приводит к ускорению рекомбинации и быстрому восстановлению населенности основного состояния меди.

Оптимальное давление H_2 определялось следующим образом. ГРТ выводилась на генерацию при давлении буферного газа Ne 30...40 торр. После этого осуществлялась подача H_2 в активную среду лазера и через каждые 0,02 торр добавки фиксировалась мощность излучения.

Данная методика определения оптимальной добавки H_2 с использованием встроенных генератора и манометра показала, что ГРТ диаметром 3,6 см и длиной 120 см достигает максимальной выходной мощности при давлении H_2 0,1 торр (рис. 3). Это значение в 5 раз меньше значения, недавно приведенного болгарскими исследователями для ГРТ аналогичных габаритов [8]. На данный момент непонятна причина такой разницы. Вместе с тем, авторы работы [8] не указывают методику определения давления примеси H_2. С другой стороны, водород, в качестве неконтролируемой примеси, всегда присутствует в разряде, о чем свидетельствует спектр спонтанного излучения. Вопрос в том, в каком количестве, но очевидно в меньшем, чем введенная добавка.

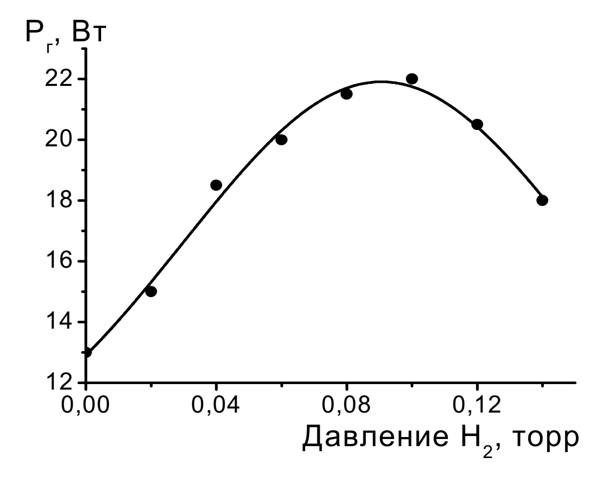


Рис. 3. *Зависимость мощности излучения ($P_г$) CuBr-лазера от давления вводимого H_2. Давление буферного газа Ne = 30 торр*

На рис. 4 показана тенденция увеличения мощности излучения CuBr-лазеров при введении в их активную среду добавки H_2 для разных ГРТ. Видно, что увеличение габаритов ГРТ приводит к снижению эффективности влияния H_2 на мощность и, соответственно, КПД лазера. Максимальное увеличение мощности генерации с добавкой H_2 до 5 раз наблюдается в ГРТ с малыми диаметрами (≤ 1 см). Мы связываем это с тем, что увеличение диаметра лазера сопровождается увеличением длины его активной зоны, что требует дополнительного повышения напряжения на разрядном промежутке. А это, в свою очередь, бывает технически сложно реализовать при использовании тиратронов типа ТГИ1-1000/25. Подтверждением данного предположения является то, что дополнительное включение в схему накачки ГРТ с диаметрами 3,6 и 5,3 см импульсного кабельного трансформатора между C_p и катодом ГРТ привело к дополнительному возрастанию мощности (отмечено звездочками на рис. 4).

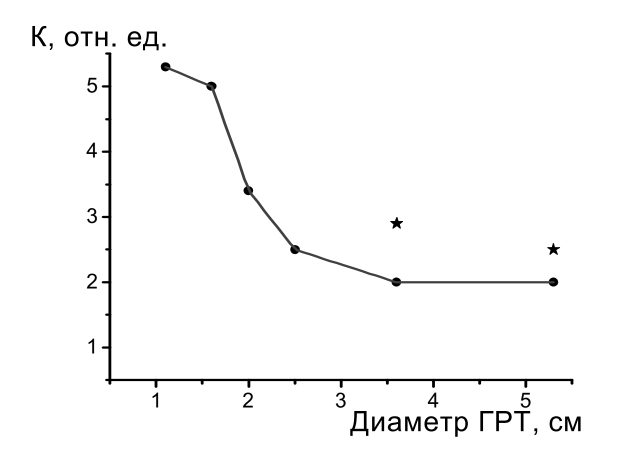


Рис. 4. *Зависимость отношения мощности излучения CuBr-лазера при использовании добавки H_2 к мощности без добавки от диаметра исследуемых ГРТ*

Исследование частотных свойств CuBr-лазера со средним диаметром ГРТ (2,6 см) показало, что максимальная частота следования импульсов накачки, обеспечиваемая данным коммутатором, без добавок H_2 в ГРТ составляет 130 кГц, причем падение мощности начинается после 30 кГц (рис. 5). Введение добавки H_2 приводит к тому, что максимальная частота достигает 250 кГц, а средняя мощность излучения при этом – 1,5 Вт. При частоте следования импульсов накачки 200 кГц выходная мощность равнялась 3 Вт. Область оптимальных частот следования (таких, при которых выходная мощность максимальна) простирается от 40 до 100 кГц, а далее начинается медленный спад мощности излучения.

Ранее, при исследовании CuBr-лазеров без контролируемых добавок водорода, максимальная выходная мощность достигалась при частотах следования импульсов 16...20 кГц, после чего наблюдалось ее снижение. Как показывают результаты этой и других работ по исследованию CuBr+Ne+H_2-лазера добавки H_2 смещают оптимальное значение частоты в область больших значений не только для ГРТ малых диаметров. Как отмечалось ранее, это объясняется увеличением скорости объемной рекомбинации плазмы.

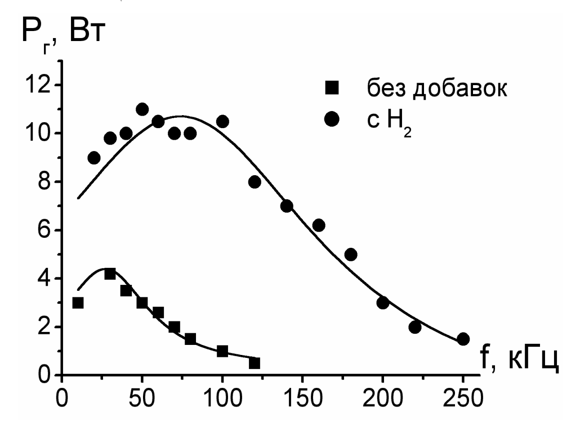


Рис. 5. *Частотная зависимость мощности излучения ($P_г$) CuBr-лазера (диаметр 2,6 см, длина 76 см) с добавкой и без добавки H_2*

В данном эксперименте лучшее значение КПД (рассчитанного по мощности, отбираемой от выпрямителя) составило 0,7 % при f = 50 кГц и $P_г$ = 11 Вт. Относительно низкое значение КПД связано с тем, что дополнительной оптимизации контура возбуждения не проводилось. Надо также отметить, что полученные $P_г$ не являются максимальными на данных частотах следования импульсов, а являются значениями, соответствующими стационарному тепловому режиму работы лазера.

Заключение

Таким образом, использование специально разработанного генератора H_2 (СРНВ) позволило повысить среднюю мощность излучения отпаянных активных элементов CuBr-лазера от 2 до 5 раз, в зависимости от диаметра ГРТ. Мы предполагаем, что эта разница связана с тем, что для ГРТ большого диаметра (и следовательно большей длины) требуется повышать рабочее напряжение на разрядном промежутке, что представляет определенную техническую проблему. Экспериментально установлено, что оптимальная концентрация добавляемого H_2 составляет <0,5 % от давления буферного газа Ne.

Использование таситрона ТГУ1-1000/25 в качестве коммутатора впервые позволило достичь практически значимых значений выходной мощности излучения на частотах накачки свыше 200 кГц. При максимально достигнутой частоте накачки 250 кГц в лазерной трубке диаметром 2,6 см и длиной 76 см мощность излучения составила 1,5 Вт. На частоте 200 кГц – 3 Вт и на частоте 100 кГц – 10,5 Вт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jones D.R., Maitland A., Little C.E. A high-efficiency 200 W average power copper HyBrID laser // IEEE J. Quantum Electronics. — 1994. — V. 30. — № 10. — P. 2385–2390.
2. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V.K., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. Copper bromide laser of 120 W average output power // IEEE J. Quantum Electronics. — 1997. — V. 33. — № 5. — P. 705–709.
3. Sabotinov N.V., Little C.E. Copper laser with high average output power // Proc. SPIE. — 1995. — V. 2619. — № 4. — P. 76–83.
4. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. CuBr-лазер с частотой повторения импульсов до 300 кГц // Квантовая электроника. — 1999. — Т. 28. — № 3. — С. 220–222.
5. Marazov O.R., Manev L.G. Externally heated CuBr laser // Optics Communications. — 1990. — V. 78. — № 1. — P. 63–66.
6. Бочков В.Д., Гошева-Маразова М.О., Климовский И.И. Излучатели лазеров на парах металлов, снабженные генератором водорода с большим сроком службы // Оптика атмосферы и океана. — 2001. — Т. 14. — № 11. — С. 1027–1029.
7. Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г. Роль отрицательных ионов в плазме импульсных лазеров на парах металлов и их соединений // Квантовая электроника. — 1997. — Т. 24. — № 7. — С. 596–600.
8. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V.K., Little L.C., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. Influence on operating characteristics of scaling sealed-off CuBr lasers in active length // Optics Communications. — 1997. — V. 135. — № 1–3. — P. 289–294.

УДК 541.16:182